



TITLE:

地震現象の様々なパターンと前兆現象 : 地震発生場としての地殻の構造とダイナミックス(基研研究会「非可逆な多体系への統計物理及びその周辺分野からのアプローチ」報告,研究会報告)

AUTHOR(S):

大内, 徹

---

CITATION:

大内, 徹. 地震現象の様々なパターンと前兆現象 : 地震発生場としての地殻の構造とダイナミックス(基研研究会「非可逆な多体系への統計物理及びその周辺分野からのアプローチ」報告,研究会報告). 物性研究 1991, 57(2): 344-347

ISSUE DATE:

1991-11-20

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/94790>

RIGHT:

## 地震現象の様々なパターンと前兆現象

—地震発生場としての地殻の構造とダイナミックス—

神戸大学理学部 大内 徹

### § 1. はじめに

最近、破壊や地震現象は非線形・統計物理学の興味ある対象として注目されるようになり、本研究会でも地震発生現象に関する研究がいくつかなされている。モデルにはいろいろあるが、基本的には、後述するような弾性反発説に基づく、粗い断層面に接した巻バネで結ばれた連性ブロックからなる系を想定している。こうした研究は、地震のべき的マグニチュード分布の説明や“Self-Organized Criticality”説のように地震現象を理解していくうえで大きく役立つことになった。

しかし一方、観測地震学の進展は著しく、ここ数年、地震発生場に対する描像は急速に変わりつつある。地殻の非弾性的性質が明らかにされてきたことと、1989年の伊豆半島沖の海底噴火のように、地震の発生に関してマグマ活動が密接に関与していることがわかってきたからである。また、最近の地学的観測により、弾性反発説発祥の北米 San Andreas 断層においても、従来基本とされてきた古典的描像も大きな変更を余儀なくされつつあると言っている（伊藤，1990）。したがって、地震の発生がプレートの相対運動による広域応力場での問題であるにしても、その詳細を理解していくうえで、また地震発生現象の数理モデル化を進めていくうえでも、地震発生場としての地殻はどのようなものなのか改めて検討する必要があるように思われる。そこで、本小論では、最近の地震学的知見をもとに、地震発生場としての地殻の性質とダイナミックスについて現象論的立場から整理し紹介してみることとする。なお本論で対象とするのは主に内陸性の地震で、プレートの沈み込みにともなう地震及び深発地震を含めた議論は別の機会に改めてすることにした。

### § 2. 地震発生場の理論

地震発生場のモデルとしては、大別して次の二つの考え方がある。一つはいわゆる弾性反発説と呼ばれる、摩擦場の stick-slip (固着すべり) を考える。他は地震発生の起源をマグマにもとめるものである。歴史的には前者は北米の地震学者が主として主張したものであり、後者は日本の多くの地震研究者が考えたものである。両者の違いは背景となる地学的条件の差にもよるようにも思える。California の巨大で明瞭な San Andreas 断層系での地震現象にふれている研究者と日本のように、多かれ少なかれ何らかのかたちで火成活動をともなう、複雑な地学的条件での地震現象に接している研究者の間の基本的姿勢の違いを反映しているものと思われる。

戦後長い間地震学を支配することになった弾性反発説は Reid により 1906 年の San Francisco 地震の経験に基づき提唱された。このモデルは既存断層を境に両ブロックが逆向きにゆっくり動くことを前提とする。両ブロックが断層面で固着していれば、両ブロックの長期にわたる互いに逆向きの運動の結果、断層周辺物質は必ず変形を受け弾性歪エネルギーが蓄積される。ブロックの運動が長期間進行すると、必ず変形による弾性反発力が増大し、やがて断層面強度に

等しくなる。このとき断層沿いに破壊が生じ、蓄積された弾性歪エネルギーが解放される。この説の問題点は、断層両側のブロックの長期にわたる互いに逆向きの水平運動源に対する合理的な説明の欠如にあったが、それはプレートテクトニクスによって解決されることになった。一方、電子計算機の発達による地震の実体波、表面波、自由振動等に対する弾性波動論の研究の成果はめざましいものがあつた。このような弾性論万能の中にあつて、地震発生場の理論として機械論的な弾性反発説が好まれたということはある意味で自然ななりゆきであつたといえよう。

これに対して、以前の多くの日本の研究者はマグマ起源説をとつた。これは、基本的に次のような根拠に基づいている。地殻変動測定の結果、地震現象に伴わない慢性的変動がいたるところに見いだされることから、地殻は短時間に作用する力に対しては弾性的に振舞うが、100～200年といった長時間にわたって徐々に作用するような力に対しては粘性・塑性的効果によって地震を起こすような弾性歪を長時間保持することはできない。また、日本ではいたるところに火山が存在し、地震と密接に関連する現象がみつかつていることもこの説の根拠となっている。大地震と火山活動の連動性については古くから指摘されているし(横山, 1971)、地震の発生と関連した温泉の変化については、1923年関東大地震に先立つ熱海の大湯温泉の間欠泉の異常噴出等、枚挙にいとまがないぐらいである。

このようなことから、地震を起こすメカニズムとして、マグマの急激な貫入による衝撃を考える(石本, 1935)とか、地殻物質の固体・液体間の相転移の熱過程を想定するモデル[地震熱機関(松沢, 1976)]が考えられたりした。こうした考えはその後ほとんど省みられることがなくなつてしまつたが、最近の伊東沖海底噴火を機に俄然復活することとなつた。1989年7月の伊東沖海底噴火により、1974年以来続いていた伊豆半島周辺での地震活動と伊東市付近での地殻隆起の源がマグマの上昇によるものであることが決定的になつたからである。また、長野県西部地震(1986年;  $M=6.9$ )や中国の海城地震(1975年;  $M=7.3$ )では、(地)震源近傍の下部地殻に部分溶融体が存在することがわかっている。こうした現象は今のところ主に火山地帯に限られているにしても、地震発生にマグマが大きな役割を果たしていることのあることはほぼ間違いのないこととなつたのである。

### § 3. 地殻の非弾性的構造と微小地震の発生

地球の表層は内陸部では厚さ30～40 kmの地殻と呼ばれる層でおおわれており、その下がいわゆるマントルである。境界はモホ面とよばれ、はっきりした境界が認められる。地殻内部ではマグニチュードが3以下のような小さい地震が常に発生している。ところが最近、この小さな地震の発生の深さ分布の限界に明瞭な境界が存在することが明らかにされるようになってきた(Ito, 1990)。地殻は地震の発生する厚さ15～20 kmのきわめて薄い脆性あるいは準脆性層とその下部の地震の起らない延性ないし準延性的な層からなる構造をしていると考えられるようになってきた。すなわち、地殻の下部は塑性的に流動しており、それは岩石物性的には熱的な要因によるものである(小林, 1976; 嶋本, 1989)と考えられている。そして、内陸部の大きな地震は、日本でもSan Andreas断層でもこのプレートが局所的にさらになつてきている所の周辺部で発生している

ようにみえる (Ito, 1990; 長谷川他, 1990) こともわかってきたのである。

実は、このような考えは古くからあり、とりたてて目新しいものではない。30年以上前の地震研究者の多くは、当時の陸地測量部の測量によって発見された地殻の地塊運動 (Tsuboi, 1933 参照) 等により次のような描像をもっていた。地表面は平均約 10 km の経を有する剛体的地塊によりモザイク状に敷き詰められており、その下部 (地殻) には粘性に富んだ比較的柔軟な物質が横たわっている。下部層の変形が表面的には地塊の上下・傾斜運動として現れる。したがって、地殻がほとんど一様な弾性体であり、地震はそこにおける弾性 (脆性) 的破壊現象であるとは考えられない (石本, 1935)。これが以前の地殻変動の研究を支配する考え方であり、前述の Reid の弾性反発説が日本で受け入れられなかった一因でもあった。

#### § 4. 非弾性的地殻変動

地殻内で起っている非弾性的変形運動を直接示唆する現象もいろいろ見つかっている。実は、プレート相互間相対運動のほとんどが実は非地震的、すなわち非弾性的、塑性的に解消されている。地震として解消される割合は日本付近で、およそ 20~30% 程度と見積られている。プレート境界では地震以外に、常にクリープが起っていて変形の大部分を解消しているものと考えられる。San Andreas 断層では場所により、目にみえるかたちでクリープが起っている。さらに、最近では、巨大な "silent earthquakes" あるいは "slow earthquakes" (Kanamori, 1989 参照) というような、ごくゆっくりと進行する地震現象が見つかっている。なかには、進行時間が数千秒というきわめてゆっくりした地震もある。さして大きくもないのに、異常に大きな津波を起こす津波地震と呼ばれるものも同様な例である。さらに最近では、大きな地震は発生していないのに地球の自由振動の励起が検出されたという報告 (Beroza and Jordan, 1990) もある。こうした現象はみな地震とは知覚されないゆっくりとした大規模な変動が地殻内で起っていることを示している。

#### § 5. まとめ

以上述べてきたことを簡単にまとめる。(1) 地殻の構造は上部の地震を発生する脆性的な層とその下部の延性的な流動層からなる。(2) 地震が発生する上部地殻も脆性的な性質と延性的な性質が空間的・時間的に現象的に混在している。(3) 日本の内陸部で発生する地震は直接マグマ活動が関係しているか、何等かのたちで熱の作用が関連している。このようなことから、地震発生現象は、たとえ結果的にそうなる (見える) にしても、単純な脆性破壊ではないということがいえるのではないか。それでは、地震発生場に対してはどのような描像を持てばよいのであろうか。地震といってもいろいろある。内陸性の地震でもプレート境界のものも、そこから離れたものもある。また、火山性のものと起こり方も性質も多様である。非常に多くの要因が複雑に関与しているので、何が本質にきいてくるのか難しい問題である。個々の場合によっても異なる可能性もある。したがって、地震の発生問題に対しては単純な一つのモデルのすますわけにはいかないかもしれない。しかし、日本の内陸の地震と California のプレート境界のものやまた中国の地震、さらにプレートの沈み込む海溝付近で起っている地震が全く違うものであるとも考えにくい。

地震発生の本源はプレートの相対運動に求められるであろうが、地殻の非弾性的性質を考えた場合、応力や弾性歪の局所的集中が起るためにはさらに付加的な条件が必要になる。この要因としては、岩石物性的な立場からいろいろ考えられるが、内陸性(少なくとも日本の場合)の地震の場合、マグマの貫入とか、相転移とか何等かのかたちで、熱の作用が関与してくることがかなり一般的にいえるのではないか。このことに関連して重要な鍵をにぎると思われる現象、内陸部の大地震は脆性層最下部から延性遷移層付近からはじまるという特異なこともわかってきている。

地震発生場の数理モデル化については最近いろいろな試みがなされており、様々なアイデアがだされている。地殻のブロック構造を考慮するような試みもある。筆者は以前反応拡散系により、断層系における弾性変形と塑性流動の拮抗を考える地殻の歪場のモデル化を試みた(Ouchi et al., 1985; 大内, 1988)。しかし、局所的な弾性変形の集中(パターン形成)が起る前提条件である、自己触媒的過程が物理的に明確ではなかった。しかし、その詳細は明確ではないにしても何等かのかたちでの熱力学的現象がこの役割を果たしているとしたらこの条件は満たされることになる。例えば、相転移あるいは地殻の弱部へのマグマの貫入が何等かのかたちで自己触媒的機構を持てばよいし、十分期待できることである。いずれにしても反応拡散系によるモデル化は地殻の非弾性的なダイナミックスを表現するひとつの可能性を示しているようにも思える。

地殻の非弾性的性質を考えると、地震発生に関する地殻の数理モデル化はいろいろ考えられると思われる。最大の困難は、地殻としてどのような媒質を考えたらよいかということである。しかし、この問題が簡単に解決していくとも思えないので、現象論的にモデルを立てていくといった立場が有効と考えている。また、従来の断層系におけるstick-slipモデル的な描像との折り合いを考えていくことも一つの課題である。その上でこの一文が役に立てば幸いである。

謝辞：京都大学防災研究所の伊藤潔氏にはいろいろ貴重なコメントを頂きましたので、改めてお礼を申し上げます。

## 文献

- Beroza, G. C., and T. H. Jordan, *J. Geophys. Res.*, 95, 2485-2510, 1990.  
 長谷川昭・堀内茂木・高木章雄, 月刊地球, 12, 562-566, 1990.  
 石本巳四雄, 地震とその研究, 古今書院, 1935.  
 Ito, K., *J. Phys. Earth.*, 38, 223-250, 1990.  
 伊藤谷生, 月刊地球, 12, 548-551, 1990.  
 Kanamori, H., *Geophys. Res. Lett.*, 16, 1411-1414, 1989.  
 小林洋二, 地震予知シンポジウム, 184-193, 1976.  
 松沢武雄, 地震の理論とその応用, 東京大学出版会, 1976.  
 Ouchi, T., S. Goriki, and K. Ito, *Tectonophysics*, 113, 31-48, 1985.  
 大内徹, 数理地震学(Ⅲ), 統計数理研究所, 61-77, 1988.  
 嶋本利彦, 科学, 59, 170-181, 1989.  
 Tsuboi, T., *Jap. J. Astron. Geophys.*, 10, 93-248, 1933.  
 横山泉, 北海道大学地球物理学研究報告, 25, 129-140, 1971.